

# Détection de défaut à l'aide d'une sollicitation thermique périodique – Etude de faisabilité

## *On the feasibility of defect detection based on thermal periodic excitation*

**Bertrand Lascoup<sup>1</sup>, Laetitia Perez<sup>2</sup>, Laurent Autrique<sup>3</sup> et Antoine Crinière<sup>3</sup>**

1 : ESTACA Campus ouest, Laboratoire Structure et Matériaux,  
Rue Georges Charpak, 53000 Laval, France  
bertrand.lascoup@estaca.fr

2 : Laboratoire de Thermocinétique de Nantes – UMR CNRS 6607, rue Christian Pauc,  
BP 50609, 44 306 Nantes Cedex 03, France  
laetitia.perez@univ-nantes.fr

3 : Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Automatisés, ISTIA,  
62 avenue notre dame du lac, 49000 Angers, France  
laurent.autrique@univ-angers.fr, antoine.crinieri@etud.univ-angers.fr

### Résumé

La mise en œuvre de sollicitations thermiques périodiques pour l'identification de propriétés thermiques (conductivité, chaleur volumique, diffusivité) de matériaux complexes à différentes échelles d'investigation (micrométrique, millimétrique) présente de nombreux avantages. Ces méthodes reposent en général sur l'observation du déphasage de l'onde thermique par rapport au signal de référence. L'évolution de ce déphasage en fonction de la distance à la source ou en fonction de la fréquence d'excitation renseigne sur le paramètre inconnu. En ce qui concerne la recherche d'un défaut, que l'on pourrait caractériser ici comme étant la cause d'une modification significative du comportement "de référence" du matériau, les approches basées sur l'analyse du déphasage et du module de l'onde thermique résultante d'une chauffe périodique restent rares. Mettant en œuvre le modèle mathématique satisfait par la température complexe, une étude de faisabilité numérique a été réalisée. Basée sur une analyse de sensibilité, celle-ci a permis de mettre en évidence l'influence de la profondeur du défaut, de sa nature, de sa distance à la source chauffante. Cette étude préliminaire fournit aussi des informations sur le protocole opératoire pour la chauffe (fréquence, puissance, taille de la source) et pour l'observation (en transmission ou en réflexion). Enfin, de premiers résultats expérimentaux sont montrés.

### Abstract

Implementation of periodic thermal excitation to identify thermal property (conductivity, heat capacity, diffusivity) of complex materials at different investigation scales (micrometer, millimeter) has many advantages. These methods are usually based on the thermal wave phase lag observation compared to the main signal. Phase lag evolution according to distance or frequency informs us on the unknown parameter. As regards to the defect detection, that we could describe as the cause of a change on the materials reference behavior, phase lag analysis on the resulting thermal wave of periodic excitation remain rare. Based on a mathematical model solved by a complex temperature, a numerical feasibility study has allowed a sensitivity analysis. This has helped to highlight the influence of the defect depth, its nature, its distance from the heating source. This preliminary study also provides information on the operating protocol, for heating (frequency, power, size of the source), and observation (transmission or reflection). Then, early experimental results are briefly exposed.

**Mots Clés :** Détection de défauts, contrôle non destructif, méthode photothermique modulée

**Keywords :** Defect detection, non destructive testing, modulated photothermal method

## 1 Introduction

De nos jours les matériaux composites, résultant de l'association d'un renfort en fibres (carbone ou verre) et d'une matrice, rencontrent un franc succès auprès de grands secteurs industriels. On peut citer en premier lieu les domaines du transport tels que l'automobile, l'aéronautique ou encore le ferroviaire. Ce succès réside dans les nombreux avantages que présentent ces matériaux ; ils

permettent, par exemple, la mise en forme des pièces complexes tout en réduisant le nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage ou autre soudure sur des structures métalliques). Ils présentent aussi une meilleure résistance aux contraintes mécaniques et une résistance accrue à la fatigue. Leur faible masse volumique est aussi un atout lorsque l'allégement des structures est une priorité. Toutefois, de même que pour tout matériau novateur dédié à une application spécifique, un contrôle des propriétés et de l'état d'une structure (assemblage, collage, résine & fibre, ...) est indispensable pour garantir leur qualité. A l'heure actuelle, la détermination d'un défaut au sein d'un matériau composite est généralement effectuée à partir de techniques acoustiques nécessitant un vecteur fluide pouvant détériorer le dit matériau [1]. Pour pallier cette éventuelle limitation, il est possible de considérer des techniques différentes basées sur l'observation du comportement thermique du matériau consécutif à un échelon de chauffe. L'observation à l'aide d'une caméra infrarouge de la scène thermique permet alors de révéler des défauts (éventuellement profonds). Dans ce cadre, on peut citer [2] présentant une détection de fissures à l'échelle micrométrique, [3] et [4] pour des applications récentes de détection de défauts en génie civil, et enfin [5] pour une comparaison avec différentes techniques de détection de défauts dans des structures métalliques. Toutefois, ces approches nécessitent en général un conséquent apport d'énergie et peuvent elles aussi entraîner une détérioration du matériau. C'est pourquoi il est attrayant de développer une méthode basée sur l'analyse de la propagation des ondes thermiques dans un échantillon soumis à une excitation radiative périodique. En effet, il est possible de recueillir des informations pertinentes à l'aide d'une chauffe modulée de puissance bien moindre que celle nécessitée par une méthode flash par exemple. Pour différentes mises en œuvre de cette approche (photothermie modulée) à des fins d'identification paramétrique, on peut se référer par exemple à [6] (identification du tenseur de conductivité thermique dans des matériaux orthotropes), à [7] (identification de la diffusivité thermique de fibres noyées dans des matrices), ou encore à [8] (présentation de différents dispositifs expérimentaux relatifs aux méthodes périodiques et permettant des investigations de l'échelle micrométrique à l'échelle décimétrique). Bien que le paramètre clé conditionnant la propagation des ondes thermiques soit la diffusivité thermique du matériau considéré, l'utilisation des méthodes périodiques pour la détection de défaut se révèle particulièrement attrayante en évitant la détérioration du matériau à expertiser. Récemment, ces techniques ont été mises en œuvre pour la détection de défauts [9] ou encore la caractérisation de dommages dans un composite aéronautique [10]. Dans [11], une application de la thermographie modulée est discutée pour la recherche de défauts dans une peinture murale (XIV<sup>ème</sup> siècle) préalablement à sa restauration. Dans [12], une récente application en génie civil est exposée.

Dans cette communication, le principe des méthodes périodiques est exposé et le modèle mathématique satisfait par la température complexe est présenté. Il est alors montré sur la base de simulations numériques la sensibilité de la méthode à certains paramètres de nuisance et la faisabilité de la détection d'hétérogénéités pour un matériau isotrope et pour un orthotrope. Enfin, le banc expérimental développé est brièvement présenté et les premiers résultats expérimentaux sont décrits. Une conclusion permet de statuer sur l'intérêt de l'approche proposée et de dresser quelques perspectives.

## 2 Modélisation de l'effet photothermique modulé

Dans ce paragraphe sont présentées les équations régissant la propagation de l'onde thermique au sein d'un matériau. Pour ce faire, la notion de température complexe est introduite. Enfin des résultats issus de simulations numériques sont présentés et les effets de nuisance discutés.

### 2.1 Mise en équations

Considérons la géométrie tridimensionnelle (Fig. 1) correspondante à un échantillon  $\Omega$ , plan, d'épaisseur  $e$ , où  $X$  est la variable d'espace,  $X = (x, y, z) \in \Omega \subset \mathbb{R}^3$  et  $t \in T$  le temps.  $\partial\Omega$  est la frontière de  $\Omega$ . La température initiale  $\theta_{amb}$  est celle, homogène, du milieu environnant.

L'accroissement, par rapport à cet état initial, de la température à l'instant  $t \in T$  et en chaque point  $X \in \Omega$  lorsqu'une des frontières  $\Gamma \subset \partial\Omega$  est soumise à une excitation périodique  $\Phi(X, t)$ , est notée  $\theta_0(X, t)$  et régie par le système d'équations aux dérivées partielles (EDP) suivant :

$$\forall (X, t) \in \Omega \times T \quad C \frac{\partial \theta_0(X, t)}{\partial t} - \lambda \Delta \theta_0(X, t) = 0 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\forall (X, t) \in \Gamma \times T \quad -\lambda \frac{\partial \theta_0(X, t)}{\partial \vec{n}} = h\theta_0(X, t) - \Phi(X, t) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\forall (X, t) \in (\partial\Omega / \Gamma) \times T \quad -\lambda \frac{\partial \theta_0(X, t)}{\partial \vec{n}} = h\theta_0(X, t) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\forall X \in \Omega \quad \theta_0(X, 0) = 0 \quad (\text{Eq. 4})$$

où  $C$  est la chaleur volumique  $[\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}]$ ,  $\lambda$  la conductivité thermique  $[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$ ,  $\vec{n}$  le vecteur normal extérieur à la frontière  $\partial\Omega$  et  $h$  le coefficient d'échange convectif  $[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$ .

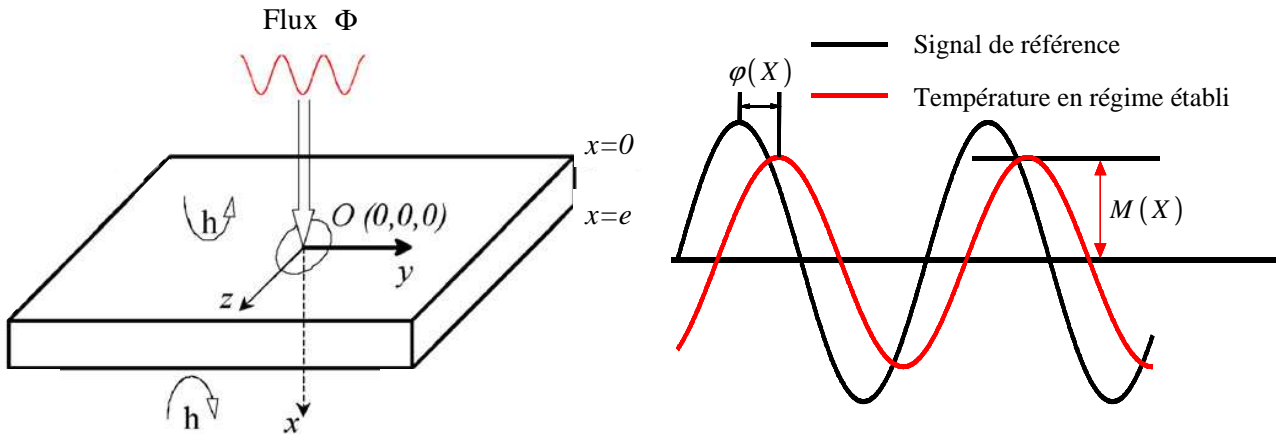


Fig. 1. Géométrie considérée et représentation des évolutions de température en régime établi.

Lorsqu'un milieu massif est soumis à une excitation périodique, sa température après une période transitoire tend vers un régime périodique. Aussi, en régime établi l'onde thermique en chaque point est caractérisée par une amplitude de l'oscillation (module) notée  $M(X)$  et un retard par rapport à un signal de référence (déphasage) noté  $\varphi(X)$  (voir Fig. 1). Introduisant la notion de température complexe  $\tilde{\theta}(X)$  (illustrée par exemple dans [6-8], un nouveau système d'EDP est considéré:

$$\forall X \in \Omega \quad j\omega C \tilde{\theta}(X) - \lambda \Delta \tilde{\theta}(X) = 0 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\forall X \in \Gamma \quad -\lambda \frac{\partial \tilde{\theta}(X)}{\partial \vec{n}} = h\tilde{\theta}(X) - \tilde{\Phi}(X, t) \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\forall X \in (\partial\Omega / \Gamma) \quad -\lambda \frac{\partial \tilde{\theta}(X)}{\partial \vec{n}} = h\tilde{\theta}(X) \quad (\text{Eq. 7})$$

La solution complexe du système  $\tilde{\theta}(X)$  de (Eq. 5-7) permet de déterminer en chaque point le module  $M(X) = |\tilde{\theta}(X)|$  (amplitude) et le déphasage  $\varphi(X) = \arg(\tilde{\theta}(X))$  (retard) de l'onde thermique résultante de l'harmonique fondamentale du signal  $\Phi(X, t)$ . Il est important de signaler que le système (Eq. 5-7) ne dépend plus du temps ce qui réduit considérablement les temps de

calcul lors de la résolution numérique (à l'aide d'un code aux éléments finis). Il est connu [6-8] que des deux grandeurs observables (module et phase) le module est celle qui est la plus sujette au bruit et aux perturbations extérieures. De plus il dépend directement de l'amplitude du signal d'excitation  $\Phi(X, t)$  a contrario du déphasage qui ne dépend pas de la puissance de chauffe. Afin d'obtenir des données fiables, il est important d'estimer la longueur de diffusion  $\mu$  en [m] qui informe sur la portée de l'onde thermique dans l'échantillon :  $\mu = \sqrt{\alpha/(\pi f)}$  avec  $\alpha = \lambda/C$  la diffusivité thermique [ $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ] et  $f$  la fréquence [Hz]. Il est admis que l'onde thermique est atténuée de 95% lorsqu'elle a parcouru  $3\mu$  dans le matériau. Pour illustrer la modélisation présentée dans ce paragraphe, plusieurs résultats de simulations numériques, sont présentés ci après.

## 2.2 Les différents modes d'analyse

Différentes méthodes d'analyse peuvent être mises en œuvre et les différentes options ci-après doivent être considérées.

- Transmission ou réflexion. En transmission, l'onde thermique résultante de l'excitation est observée sur la face opposée à la chauffe. Dans certaines situations, si la face opposée n'est pas accessible à la mesure, les observations sont réalisées sur la même face que l'excitation (on parle alors de réflexion).
- Balayage spatial ou vobulation. Le déphasage de l'onde thermique peut être tracé en fonction de la distance à l'excitation (à fréquence constante) ; il s'agit d'un balayage spatial. Si l'observation est réalisée en un point fixe mais pour différentes fréquences, il s'agit d'un balayage fréquentiel (appelé aussi vobulation).

Ainsi, quatre modes d'analyse peuvent être retenus. Par la suite, on retiendra pour des raisons expérimentales (voir dernière section) le mode : balayage spatial en transmission.

## 2.3 Simulations numériques

Les simulations présentées ci après correspondent à des matériaux plans et traitent un matériau isotrope conducteur et un orthotrope (fibres carbone dans résine époxy). La chauffe périodique est assurée sur une surface plane sur un disque de rayon 5 mm avec une puissance de  $10^5$  [ $\text{W.m}^{-2}$ ]. Le coefficient d'échange par convection naturelle est supposé égal à  $h=15$  [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ]. Les données des essais effectués sont présentées dans le tableau (Tab. 1).

	Matériau isotrope (titane)	Matériau orthotrope
Conductivité thermique $\lambda$ en [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]	21.6	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Chaleur volumique $C$ en [ $\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ ]	$2.4 \cdot 10^6$	$1.6 \cdot 10^6$
Fréquence en [Hz]	0.1	0.05
Longueur de diffusion $\mu$	$\approx 5$ mm	$2 \leq \mu \leq 5$ mm
Epaisseur $e$	1 mm	3 mm

Tab. 1. Données pour les simulations numériques.

Sur les figures suivantes, les distributions de déphasages et de module (sur la face non chauffée : en transmission) sont présentées pour les différents matériaux. Lorsque le signal est trop faible,  $M(X) = |\tilde{\theta}(X)| < 0.1^\circ\text{C}$  pour être exploitable, le déphasage  $\varphi(X) = \arg(\tilde{\theta}(X))$  n'est plus estimé.

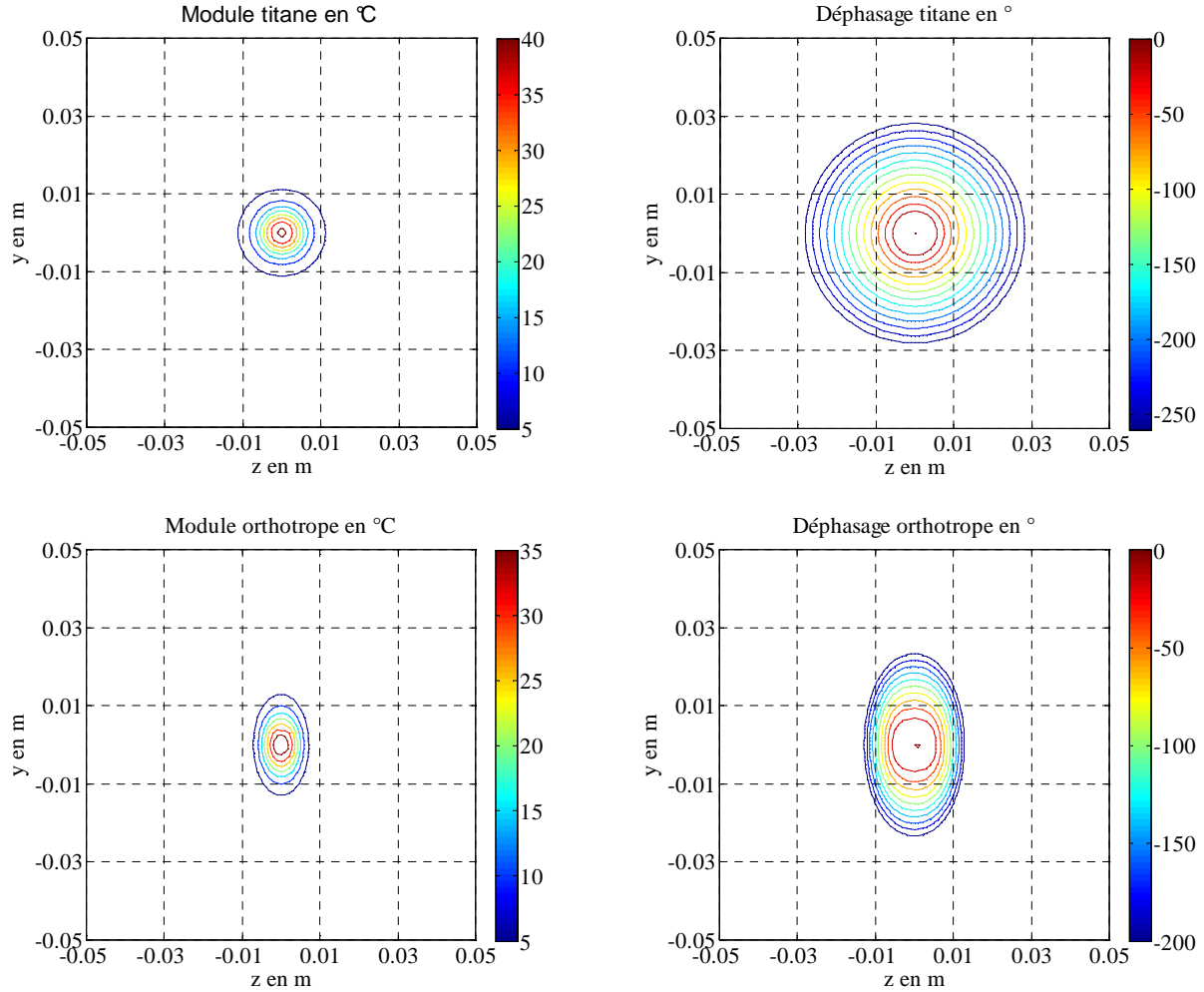


Fig. 2. Modules et déphasages simulés pour le titane et le matériau orthotrope.

Sur la figure (Fig. 2), obtenue à l'aide du code aux éléments finis Comsol®, il est noté pour le matériau isotrope (titane) qu'à la fréquence d'excitation de 0.1 Hz (période de 10s) une amplitude de 40°C est obtenue au centre de la plaque. De plus, l'orthotropie du matériau composite est mise en évidence sur les courbes de déphasage et de module. Ce type de simulation peut aussi être utilisé en préliminaire à toute campagne expérimentale afin de s'assurer que le signal est exploitable. Si la longueur de diffusion n'est pas suffisante, la fréquence doit être diminuée. Il est aussi nécessaire de vérifier qu'aucun effet de bord ne perturbe la propagation de l'onde thermique.

## 2.4 Effet des paramètres de nuisance

Une étude de sensibilité permet de quantifier l'effet de chacun des paramètres d'entrée  $p \in \{\alpha, h, \Phi, e, f\}$  du modèle sur le module et le déphasage. Dans le cas du matériau isotrope (titane) dont les données sont présentées dans le tableau précédent (Tab. 1) les sensibilités réduites  $p \frac{\partial M(X)}{\partial p}$  et  $p \frac{\partial \phi(X)}{\partial p}$  en fonction de la distance sont données dans la figure suivante (Fig. 3).

Sur cette figure, on peut noter que dans la configuration étudiée, la méconnaissance des échanges convectifs (coefficient  $h$ ) n'a pas d'influence sur le module et le déphasage. L'épaisseur est un paramètre clé (pour la configuration en transmission) et il est nécessaire de maîtriser la fréquence d'excitation. En revanche, l'amplitude de la chauffe est influente pour le module des oscillations de température mais non sur le déphasage. Enfin, il est vérifié que la nature du matériau (diffusivité)

est un paramètre clé pour la propagation d'une onde thermique en son sein. Les mêmes considérations peuvent être retenues pour les matériaux orthotropes.

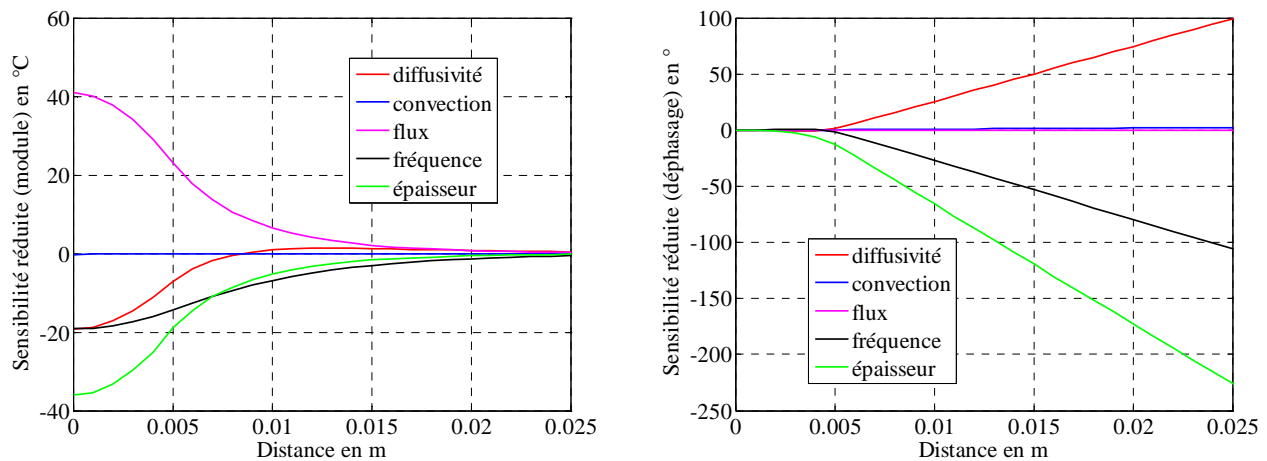


Fig. 3. Sensibilités réduites.

Dans le paragraphe suivant, l'outil numérique prédictif correspondant à la résolution des équations (Eq. 5-7) est mis en œuvre afin de détecter la présence d'un défaut.

### 3 Etude de faisabilité numérique

Dans ce paragraphe, l'effet d'un "défaut" dans un matériau sur la propagation de l'onde thermique est mis en évidence. Pour ce faire, la différence de comportement (amplitude et déphasage) de l'onde thermique entre le matériau "sain" et le matériau "défectueux" est montrée à l'aide de simulations numériques. La configuration suivante est retenue : transmission et balayage spatial. La puissance de chauffe est de  $10^4 \text{ [W.m}^{-2}\text{]}$ , la chauffe sur un rayon de 5 mm est centrée sur la face supérieure  $(0,0,0)$  et le coefficient d'échange par convection naturelle est supposé égal à  $h = 15 \text{ [W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}\text{]}$ .

#### 3.1 Détection d'une inclusion

Le matériau sain est un élastomère (plaque d'épaisseur 3 mm) comprenant une inclusion (disque en verre de 1mm d'épaisseur et de 5mm de rayon). Le centre de cette inclusion est situé au point  $(1.5, 10, 0)$  (en mm), on peut se référer à la figure (Fig. 1). La configuration étudiée est décrite dans le tableau suivant :

	Conductivité thermique $[\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}]$	Chaleur volumique $[\text{J.m}^{-3}\text{.K}^{-1}]$
Elastomère	0.24	$1.7 \cdot 10^6$
Défaut en verre	1.38	$1.5 \cdot 10^6$

Tab. 2. Données thermo physiques pour illustrer la détection d'une inclusion.

La fréquence d'excitation est de 0.001 Hz et les différences entre matériaux sain et défectueux sont exposées ci après (Fig. 4). Cette figure permet bien de visualiser la présence d'un défaut, que cela soit par l'observation des cartographies de module ou de déphasage. Il est toutefois difficile d'estimer par une simple analyse visuelle la forme, la profondeur, l'épaisseur ou encore la nature de celui-ci.

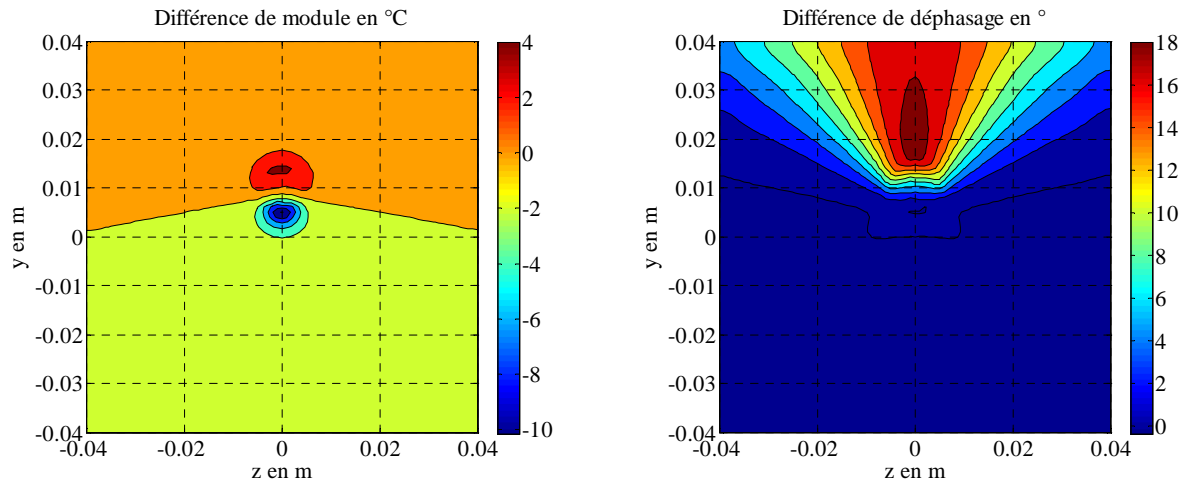


Fig. 4. Détection de l'inclusion.

### 3.2 Détection d'une orientation de fibre "accidentelle"

Le matériau sain est la plaque composite de la section 2.3 (fibres carbone dans résine époxy, épaisseur 3 mm). Le défaut correspond à une plaque carré de  $1 \text{ cm}^2$ , d'épaisseur 1mm présentant un sens d'orientation des fibres orthogonale à celle de l'ensemble de la plaque. Le centre de ce défaut est situé au point  $(1.5, 10, 0)$  (en mm). La configuration étudiée est décrite dans le tableau suivant :

	Conductivité thermique $[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	Chaleur volumique $[\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}]$
Composite	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$1.6 \cdot 10^6$
Défaut d'orientation	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}$	$1.6 \cdot 10^6$

Tab. 3. Données pour thermo physiques pour illustrer la détection d'une orientation accidentelle

La fréquence d'excitation est de 0.005 Hz et les différences entre matériaux sain et défectueux sont exposées ci après.

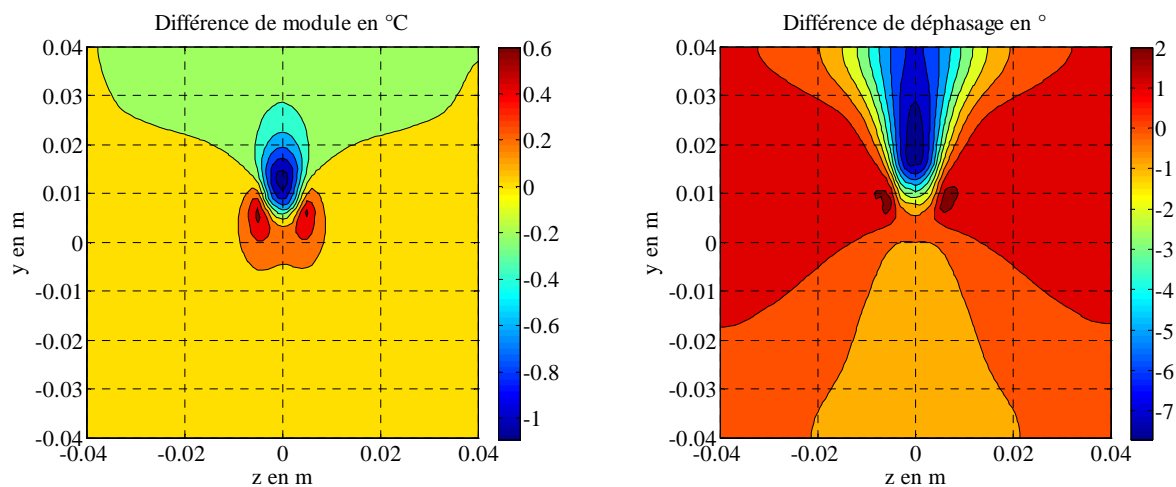


Fig. 5. Détection de l'orientation accidentelle de fibres dans un matériau composite orthotrope.

Sur la figure précédente, la présence du défaut (orientation perpendiculaire des fibres de carbone) à l'intérieur de la plaque étudiée, modifie suffisamment la propagation de l'onde thermique pour en permettre la détection en analysant les différences d'amplitude (module) et de déphasage.

#### 4 Premières campagnes expérimentales

Les résultats des simulations numériques présentées dans la section précédente montrent que l'analyse de la propagation de la chaleur provoquée par une sollicitation thermique périodique peut permettre la détection de défauts au sein d'un matériau. Le dispositif expérimental développé à partir de ce principe est présenté dans ce paragraphe ainsi que les premiers résultats obtenus sur des matériaux comportant une hétérogénéité.

##### 4.1 Description du dispositif (photothermie modulée) et des échantillons à tester

Afin de valider la méthode présentée permettant de mettre en évidence la présence de défauts, un dispositif expérimental a été conçu. Celui-ci se compose de trois parties principales (Fig. 6.a) : une caméra Flir A20, une ampoule (source chauffante radiative) et un dispositif optique de Köhler permettant d'obtenir une distribution spatiale uniforme de la chauffe. L'échantillon est positionné dans le plan focal du dispositif de Köhler.

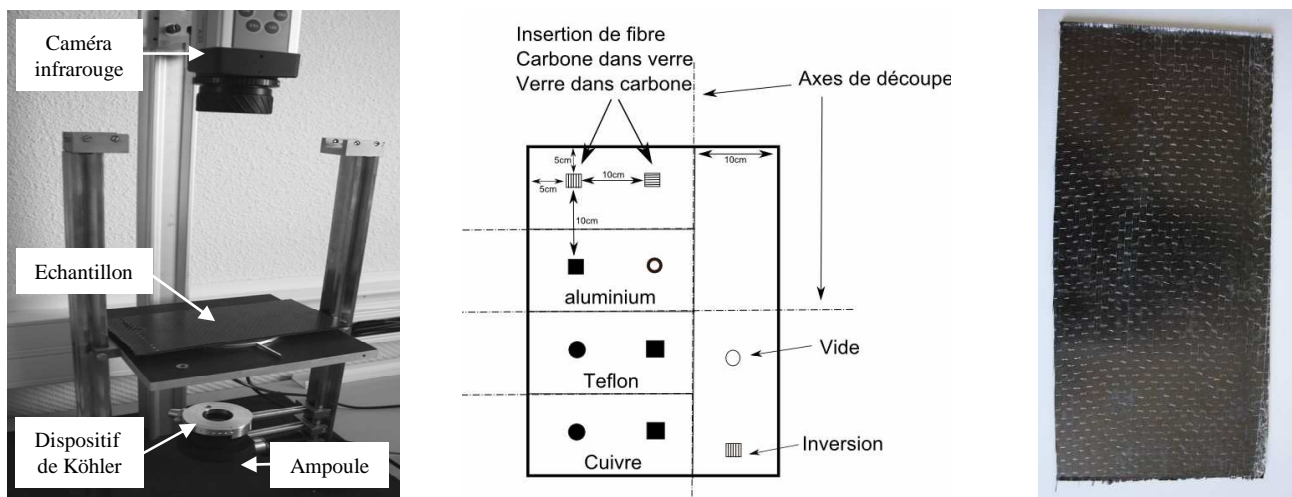


Fig.6. Dispositif expérimental (a) et échantillons à tester (b et c)

Dans le but de vérifier la faisabilité de la méthode proposée, une plaque (Fig. 6. b et c) de Carbone-époxy orthotrope de 30x40cm, d'une épaisseur de 1.7mm (sept couches), dans laquelle des défauts ont été intégrés au niveau de la quatrième couche, a été réalisée au sein du Laboratoire Structure et Matériaux de l'ESTACA (École Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile) sur le site de Laval.

##### 4.2 Premiers résultats

Les résultats présentés ci-dessous correspondent à la détection du défaut carré (plaque de cuivre de 1cm de côté et de 0.2 mm d'épaisseur) dans le matériau orthotrope (fibres carbone dans résine époxy). La fréquence d'excitation est de 0.048 Hz et le rayon de chauffe est d'environ 3.6 mm. La puissance de l'ampoule est de 300 W. Les courbes suivantes (Fig. 7) montrent les cartographies de module et de déphasage en transmission dans la zone expertisée pour le matériau sans défaut et avec défaut. Les différences de modules et de déphasages sont aussi représentées.

La présence du défaut est indéniablement détectée. Sachant que la confiance que l'on a dans les amplitudes est de l'ordre 0.2°C et dans les déphasages de l'ordre de 5°, l'analyse des courbes révèle bien la présence et la position du défaut.



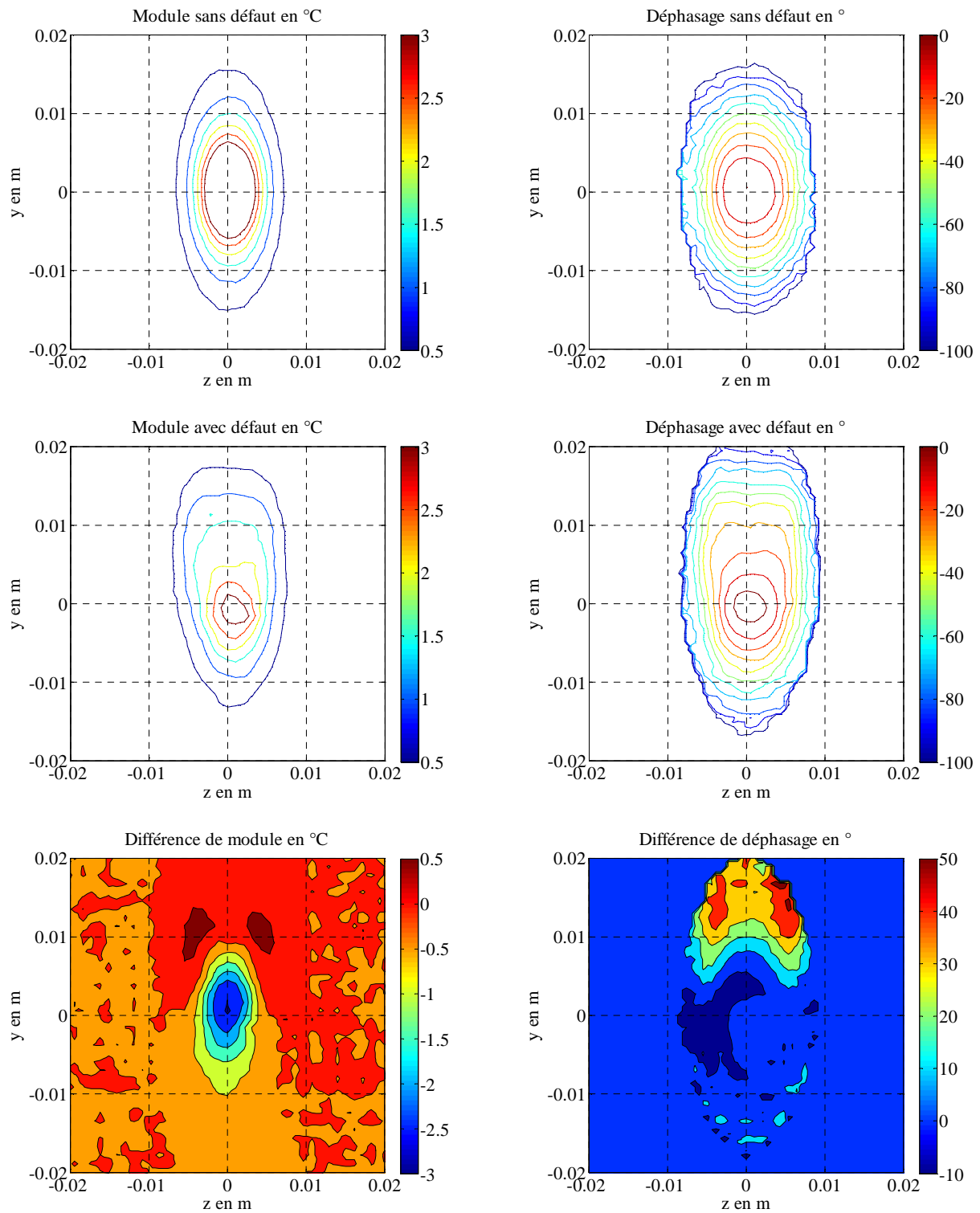


Fig. 7. Cartographies de modules et déphasages : premiers résultats expérimentaux.

## 5 Conclusions et perspectives

Les résultats présentés dans cette communication ont permis de montrer, dans les configurations étudiées, que la détection de défauts à l'aide d'une méthode photothermique modulée était réalisable. L'attrait majeur de cette technique est la non détérioration du matériau par un apport d'énergie relativement faible. Ce dernier point doit permettre de nombreuses applications en génie biomédical où les tissus testés ne peuvent subir d'élévation de température importante.

Par la suite, différents type de défauts seront testés. En particulier, en sus des hétérogénéités citées dans cette communication, des modifications de structures (provoquées par un impact par exemple) seront étudiées.

Au delà de la détection d'un éventuel défaut et de l'estimation de sa position, il est souhaitable de caractériser celui ci (nature, géométrie, position). Pour ce faire une méthode inverse doit être mise en œuvre. Celle ci devra se baser sur les différences de cartographies de module et de déphasage afin, par une procédure itérative (de type Levenberg-Marquardt par exemple), de minimiser un critère quadratique (minimisation par erreur de sortie).

## Remerciements

Les partenaires de ce programme de recherche remercient le réseau ECND-PdL (Estimation et Contrôle Non Destructif dans la région Pays de la Loire) et l'ISTIA (Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers) pour leurs soutiens.

## Références

- [1] T. HASIOTIS, E. BADOIANNIS, N.G. TSOUVALIS, « Application of Ultrasonic C-Scan Techniques for Tracing Defects in Laminated Composite Materials Cracks detection by a moving photothermal probe ». *4<sup>th</sup> international conference on NDT*, Crète, Grèce, 11-14 octobre 2007.
- [2] J.L. BODNAR, M. EGEE, C. MENU, R. BESNARD, A. LE BLANC, M. PIGEON, J.Y. SELLIER, « Cracks detection by a moving photothermal probe ». *Journal de physique IV*, colloque C7, 4, juillet 1994.
- [3] M. MARCHETTI, S. LUDWIG, J. DUMOULIN, L. IBOS, A. MAZIOUD, « Active infrared thermography for non-destructive control for detection of defects in asphalt pavements ». *9<sup>th</sup> international conference on quantitative infrared thermography*, Krakow-Poland, 2-5 July 2008.
- [4] J. DUMOULIN, V. FEUILLET, M. MARCHETTI, T. SAUVAGNAT, L. IBOS, A. MAZIOUD, « Evaluation de méthodes de détection de défauts par thermographie infrarouge active dans des échantillons d'enrobés bitumineux ». *Congrès national de la Société Française de Thermique*, golfe du Morbihan, Vannes, mai 2009.
- [5] S. MAILLARD, J. CADITH, D. ESCHIMESE, H. WALASZEK, H. MOOSHOFFER, J.C. CANDORE, J.L. BODNAR, « Towards the use of passive and active infrared thermography to inspect metallic components in the mechanical industry ». *10th Int. Conf. on Quantitative InfraRed Thermography*, Québec, Canada, 27-30 July, 2010.
- [6] L. PEREZ, L. AUTRIQUE, « Robust determination of thermal diffusivity values from periodic heating data ». *Inverse Problems IOP journal*, 25-4, pp. 45011-45031, 2009.
- [7] L. AUTRIQUE, L. PEREZ, J.J. SERRA, « Finite element modelling for microscale thermal investigations using photothermal microscopy data inversion ». *Measurement Science Technology*, 18, pp. 1-11, 2007.
- [8] L. AUTRIQUE, L. PEREZ, E. SCHEER, « On the use of periodic photothermal methods for material diagnosis ». *Sensors and Actuators B*, 135-2, pp. 478-487, 2009.
- [9] M. ISHIKAWA, H. HATTAL, Y. HABUKA, S. JINNAI, S. UTSUNOMIYA, K. GOTO, « Pulse-phase-thermographic non-destructive testing for CRFP specimen ». *14<sup>th</sup> European Conf. on composite materials*, Budapest, Hungary, 7-10 June 2010.
- [10] S.A. GRAMMATIKOS, E.Z. KORDATOS, N.M. BARKOULA, T. MATIKAS, A. PAIPETIS, « Innovative non-destructive evaluation and damage characterization of composite aerostructures ». *14<sup>th</sup> European Conf. on composite materials*, Budapest, Hungary, 7-10 June 2010.
- [11] J.C. CANDORE, G. SZATANIK, J.L. BODNAR, V. DETALLE, P. GROSSEL, « Infra-red photothermal thermography : A tool of assistance for the restoration of murals paintings ? ». *Actes du congrès QIRT2006*, Padoue (Italie), Article 37 (cd), 28 au 30 juin 2006.
- [12] T. SAKAGAMI, Y. IZUMI, N. MORI, S. KUBO, « Development of self-reference lock-in thermography and its application to remote nondestructive inspection of fatigue cracks in steel bridges », *10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Québec (Canada), 27-30 July, 2010.